

地热学: 90年代展望

Geothermics: Prospect for the 90's

沈显杰

(中国科学院地质研究所, 副研究员)

一、学科性质和研究对象

地热学可追溯到远古洪荒时期的火山、温泉、地震等地理景观的记载和描述。传热学的出现才为近代地热学奠定了科学的基础,使定性的描述进化为定量的测量。因此,地热学首先是一门量测科学,其主要的研究对象是温度、热量、热流和物质的传热性能。

作为地球科学的一个分支学科,地热学是一门探索地球的热结构、热状态、热演化和热历史的基础科学。无论是基于“大爆炸”理论的宇宙成因学说,还是基于放射性物质聚积致热的“冷成说”或太阳系裂解的“热成说”,地热学在一定意义上都是以探求天体热演化为主旨的基础科学。不论起源于冷成还是热成,目前的地球由核-幔-壳、固-液态交替的球环状层圈结构所构成,以及由地表常温递增至核心处数千度的高温,则是地球自数十亿年前形成以来演化至今的一个瞬间状态,目前仍处于动态演化的过程中。地球深部的炽热状态是整个地球演变或灾变的主要动力来源;反之,地球上任何一种重要的变化或变革都将产生深刻的热效应,并记录在地球的热演化历史中。这种既是运动的动力又是运动的产物的因果辩证关系,是能量守恒和转换法则的体现,也是地热学的基本物理基础之一。

地热学同时又是一门涉及资源与环境,因而与人类的栖息和生存密切相关的应用基础科学或应用科学。地热最直观的含义是一种能源。已故的李四光教授称“地球是一个巨大的热库”具有深刻的科学哲理。通过地球表面向太空耗散的热流密度看似微小(全球平均63毫瓦/平方米),且难于集中利用,但在全球规模上构成重要的热平衡项,全球表面的总散热功率相当于当前人类总能源消耗

的数千倍。真正能供人类开发利用的地热资源,集中分布在几个全球规模的大型地热带,如大洋中脊地热带(冰岛、加利福尼亚湾和美国西部盆岭省等,后者属洋脊上陆壳底扩张类型),环太平洋地热带(苏联堪察加、日本、菲律宾、印尼、新西兰、智利、秘鲁…等),以及喜马拉雅-地中海地热带(意大利、中国西南部藏滇地热带…等),这三个全球规模的地热带都分布在不同类型的板块边界上,相当于“热库”的线性露头;此外尚有一系列裂谷或断陷盆地等板内型点状地热露头,也可形成一定的地热资源赋存区,但因规模小且分散,并不构成全球的重要热平衡项。

在各个地质历史时期,地球通过热演化,将众多的有用元素富集于表层,形成各种矿产和资源,供人类享用。在这层意义上地球是慷慨的。无论是煤炭、石油、天然气、铀矿等能源资源,还是多种金属和非金属矿产资源,其成矿的过程和机理都记录着独特且具有专属性的地球热演化历史的各个片断。研究各个片断用于找矿,连接各个片断以恢复地史和热史进而指导找矿,这种理论联系实际,指导实践,又通过实践验证而丰富和发展理论,是包括地热学的地球科学的循环-反馈式认识论的重要特点。

对于人类,地球并非始终是慷慨的,有时它又无情地孕发火山、地震、山崩地裂等不可抗拒的地质灾害,剥夺人类的生命财产,破坏生物的生存环境。多数孕育于地球内部的地质灾害,通常是与热量的积聚、迁移和释放有关的。再者,人类采矿向深层开拓时,地球的内热会构成不利于人类活动的“热害”,必须采取通风、排热、制冷、降温等一系列工程措施控制环境恶化。此时,地热学又是一门应用基础科学(火山监测,地震预报等),或甚至是一门纯应用性的工程科学(热害的探查、预防和治理等)。

综上所述,地热学既是一门基本的量测科学和探索地球热形成历史的基础科学,同时又是一门研究能源资源和灾害环境的应用基础科学,乃至热害防治的应用工程科学。相应地可以将地热学分为实验地热学,理论地热学和应用地热学三个学科分支。这三者是缺一不可,密切相关的。实验地热学为整个地热学提供可靠的测量方法和精密的量测数据,为定量研究地球内部热学过程奠定基础;理论地热学将量测数据与多学科的地学理论相结合,不断开拓在地球热成因演化中的新研究思路、观点和方法,瞩目于关键理论和完整知识体系的形成,起着学科导向的作用;应用地热学则开辟广阔的实践领域,在不断解决能源、资源、灾害、环境、工程课题的同时,积累大量地热测量数据,检验和验证众多的地热理论和模式,以强劲的反饋冲击力推动理论地热学和整个地热学的发展。

可以毫不夸张地说,地热学是一门具有广阔发展前景和学科开拓潜力的地球科学门类中的综合学科体系。

二、学科内涵和跨学科的交叉融合

就理论地热学的学科内涵而言,地球热历史和壳幔热作用机制是与地质构造演化和深部动力过程在研究内容上起配套补充作用的,理应属于地质学,尤其是深部地质和地球动力学的学科范畴。而实验地热学的学科内涵主要是大地热流(或热流密度 q)的测量, q 的测量与地球物理学中地震波速 V 、岩石密度 ρ 、磁化强度 J 和电导率 κ 等地球物理参数起补充和配套的作用,因此又隶属于地球物理学中与重、磁、电、震并列的物理方法系列。应用地热学的学科跨度更大,它与地震学、火山学、能源科学、环境科学等应用基础学科,以及工程地热学等应用科学有着广泛的学科交叉和渗透融合的密切联系。由此可见,地热学是介于深部地质学与地球物理学之间,又具有一定工程科学特性的一门交叉学科。事实上,与相邻地球科学和工程科学保持密切的学科联系是地热学活力之所在,同时表明地热学仍是一门相对年青的,学科内涵尚未完全定型配套的新兴的基础—能源—环境—工程科学。

理论地热学的学科内涵尤其广阔,它将地球视为一个热成因的行星作为研究对象,浅则包括地壳和岩石圈上地幔,深则扩及深部地幔乃至核—幔边界;目前主要的研究重点仍是固态的岩石圈。研究的内容包括静态的岩石圈热结构和热状态,以及动态的岩石圈热形成和热演化历史。主要的研究方面集中于:热场、热源、热动力驱动过程和岩

石圈构造变形的热响应。

首先,地热学方法是將地球及其上的岩石圈作为一种地球物理场来研究的。以壳幔三维温度分布为表征的热场(或地温场)是一种特殊的基本地球物理场,它既与岩石波速场、重力场、磁场和电场有紧密的联系,又与它们有本质的区别。波速、重、磁、电场是地球物质的物性场,而温度场是一种环境场,它以独特的方式影响物质的物性场,亦即同一种物质组分和结构的岩石,在不同的温度(压力)时,可以处于不同的状态(固态,部分熔融状态,液态,极少为气态)和热态,从而处于不同的原子—分子运动水平,相应的波速特性、物质密度、磁性和电性都会有程度不同的(有时是很急剧的)变化。事实上,与热场相对应的也有一种物性场,即岩石热导率场(K),它也随温度的变化而改变。应该说,对于同一种地球物质,所有的物性场是内在一致的,它们以关联的方式受同一种环境热场(更广义地可定义为 $T-P$ 场)的控制。此即在一定的状态和热态下,岩石具有固定的 $V-\rho-J-\kappa-K$ 物性组合。另一方面这充分说明,地球物理场中包含了丰富的间接地热信息。地热场研究不仅包括壳幔热结构和热状态的静态信息,而且地球内部动态演化的热信息均无一例外地反映到热场中来。所有这些正是地热学与地球物理学之间存在密切学科交叉联系的原因所在。

地热学是研究地球内热的科学,地球内部热源历来是理论地热学的重要研究课题。地热学中的基本地球物理参数是大地热流,简称热流,用 q_0 表示之,量纲为 mW/m^2 ,其物理意义为:单位时间(sec)内通过单位面积(m^2)地球表面由地球深部向太空耗散的热量(J)。近代研究表明,实测的 q_0 由两部分构成:一部分直接来自地幔深部,称为深部热流或地幔热流分量,记为 q_m ,约占 q_0 的50~60%, q_m 的大小大致反映该地质体深部构造活动性的强弱,不同地质构造区的 q_m 可以有较大的差异;另一部分源自地壳岩层中的放射性元素(主要为铀、钍和钾)衰变的生热贡献,称为地壳热流分量,记为 q_c 。通过实验测定地壳岩石标本的放射性热元素丰度(地幔岩的丰度极低),可以将 q_c 和 q_m 两个热流分量区分开。因此, q_0 值既定义了测点所在地质单元的深部构造活动性,同时又反映壳内放射性生热元素的丰度;在已知岩石热导率(通过岩石标本的实验测定)的前提下, q_0 还定义了壳幔垂向一维温度分布。地表热流的壳幔双分量构成,代表地球形成演化中的两种主要热源:地幔深部热源和地壳放射性热源。所谓深部热源,究其起源实质上也源自地球内部的放射性衰变生热过程。地球内热的放射性起源把理论地热学与地球化学的研究内容紧紧地联系在一起,因为铀、

钍、钾作为地球岩石中三种主要的放射性生热元素,其生成、分布、迁移、富集等过程,无不与岩浆的形成、分异和演化密切相关。现今壳幔岩石的放射性生热元素的分布状态和丰度,是该地质体所经历的地球化学演化历史和环境的综合产物。

地球内部蕴藏的巨大热能及其动态变化,是驱动漂浮其上的岩石圈板块不断运动的巨大动力。地球内部能量分布的不均一性和热量滋生的脉动性,加上由地球自转动量诱发的液态地幔的对流运动,更加剧了全球规模的板块运动。因此,大洋板块在洋脊新生,受地幔对流驱动而向两侧扩张时经历热收缩固化而形成洋盆,进而在消减带通过俯冲融化回返地幔,以及地球历史中多次洋盆闭合、碰撞造山成陆等一系列海陆岩石圈循环往复的形成演化历史,在一定意义上都是其完整热史的各个篇章。更确切地说,热能可以驱动板块运动,反之,板块运动所派生的构造变形、变质、岩浆活动本身又可以生热,或诱发一系列热过程,或残留显著的热响应。从宏观的地球科学观点论之,岩石圈的构造演化和热演化本质上是密不可分的,两者之间存在着紧密的驱动—诱发式成因联系和耗能—生热式热平衡关系。当今地球岩石圈即处在构造运动和热作用这两大过程系列之间的动态平衡状态之中。理论地热学的这方面研究内容属于热形成历史和热演化的动态研究范畴,其间涉及到多门地质学的学科分支:通过地球动力学研究孕发于壳幔深部的各种动力热过程;通过深部构造地质学分析岩石圈构造应力场和热应力场的分布及相应的岩体应变速率和应变生热强度;通过流变学 and 高温高压实验岩石学研究岩石在高温高压状态下的性状、物性及其变形的过程和机制;通过变质岩石学和深源包体的研究,用实验方法推测地球深部物质变形变质的P-T-t路径,等等。由此可见,理论地热学是一门内涵丰富、学科交叉甚广的综合地学理论科学。

应用地热学和实验地热学也有广泛的学科间的交叉和融合。试以应用地热学为例,若以地热能开发利用,油气及其它热成因矿产资源的探查和矿井热害防治这三项作为其主要研究内容,则它需分别用到热储工程学、古地热学和工程地热学等学科的某些知识领域。热储工程学作为地热能科学的一个独特的知识体系,其内容涵盖资源探查、参数计算、试井资料分析、热储模型建立、资源潜力评估、开采动态预测,以及最佳开发制式的模拟论证等,它是热力学与地下水力学两种知识体系交叉融合而形成的。古地热学则应用将今论古的方法,通过变质矿物岩相鉴定,地质温标,镜质体反射率测定等手段,阐明油气形成的门限温度,油气成熟度,聚烃和汽化窗口等指标,以最终

圈出有利的油气生成和储集的区段及其运移富集的热学过程。工程地热学则主要应用井巷岩面传热和热交换理论及热力学计算,解决井巷空气温度预测,通风配风制式及一系列与热害防治有关的工程热学课题。另一方面,实验地热学作为一门实验科学领域,需要运用一系列相邻学科的知识体系,诸如固体传热学、计量科学、统计学,以及精密仪器科学等。

三、90年代地热学的发展趋势

在进入21世纪之前,地热学作为地球科学的一个综合的基础学科分支、能源应用科学和实验量测科学,都将有以深化和学科进一步渗透融合为特征的长足发展。

理论地热学的发展将集中在以下三方面:

1. 逐步形成以地球动力学为主要学科支柱的综合理论地热学知识体系。首先必须建立各种深部热动力过程的物理机制和相应的数学方程,既包括由热动力驱动的深部构造过程的数理基础,又包括构造变形各种热效应的数理方程;在地热学与地球物理学之间已建立初步学科联系的基础上,促进和加深地热学与地球化学的渗透融合,从而形成完整的特性—状态体系、力学—运动学体系和环境—条件体系之间的合理配置。可以预期,深源岩石学、流变动力学和实验岩石学将成为理论地热学的相关学科分支而越来越紧密地结合。在此基础上,高温高压相变、热应力的场效应,以及壳幔深部的聚能—耗能、生热—吸热、增温—降温等一系列综合热平衡过程,将以前所未有的研究深度用于解决宏观地质区的综合的构造热演化课题。

2. 建立统一的热场—地球物理场的数理基础,是可望在90年代起步的地球科学发展的一项重要进展。迄今已有多种单一地球物理场与温度(压力)相关性的研究,例如,应用大地电磁测深结果计算地表热流,居里面温度的定义和计算,低速高导层的温压响应,基于密度变化的重力场的温度响应等。然而,统一地学场论的建立,将深刻地揭示地球物质综合物性之间存在内在统一联系的微观机理和宏观规律,这将使地球科学的面貌发生某些根本性的改观,而其中最根本的环节是加深对深部地球物质物性的全面研究。因此地热—地球物理—地球化学三个分支学科之间必将趋于更紧密的交叉、融合和相互渗透。

3. 大地热流全球解释模型的建立,是90年代理论地热学研究的一个重要发展趋势。目前在全球的洋区和陆区共测量了2万余个大地热流数据,

(下转第55页)

科学技术是否重视的问题。调查结果,认为“很重视”的占6.2%,认为“比较重视”的占48.5%,两项合计为54.7%。此外,有36.7%的认为“不太重视”,有7.0%认为“不重视”。

尽管对有关国家重视科学技术与否的问项应答者的判断并不集中,但从总体看,大多数科学家和工程师的评价还是倾向于予以肯定。值得注意的是,也有相当数量的科学家和工程师认为国家对科学技术重视不够,应该说,这反映了这部分科学家对国家的期望。

“脑体倒挂”问题

在本次调查中,我们就“脑体倒挂”现象能在多长时间内获得解决征询应答者的意见。调查结果,有68.2%的人认为“要经过一个很长的时期才能解决”,有24.5%的人认为“不可能得到解决”,两项合计达92.4%,而认为“有希望在一个比较短的时期内解决的只有4.0%”。

科学家和工程师的职业政治观

对改革前景的展望

当前社会上下以及国际舆论对改革的前途都极为关注,科学家与工程师当然也不例外。

调查表明,从总体上看,科学家和工程师对中国改革的未来有相当的信心,有11.0%的人选择“大有希望”,52.8%的人选择“比较乐观”,两项合计,达62.8%。这说明,中国的改革,多数科学家与工程师认为是比较成功的,也是充满希望的。但是,由于改革过程的长期性和复杂性,也有相当一部分科学家和工程师有悲观情绪(不太乐观的占31.0%,很不乐观的占2.3%)。

科学家和工程师的职业政治观

我们对下述四个命题进行了语义测试,以了

解科学家与工程师的职业政治观:1.“我们国家的昌盛取决于科学技术”;2.“科技工作者是工人阶级的一部分”;3.“科技工作者是先进生产力的代表者”;4.“科技工作者应该而且能够在社会主义建设中发挥巨大作用”。每个命题从不同意到同意在语义差度上分“1~5”五个档次,1代表不同意,5代表同意,中间档次代表不同意和同意之间的中间水平。

我们国家的昌盛取决于科学技术 对这一陈述,有56.4%的应答者表示同意。另外,有14.8%的应答者选择“4”这一对应“基本同意”的答案。这意味着,高达71.2%的科学家和工程师对“我们国家的昌盛取决于科学技术”这一陈述持肯定态度。

科技工作者是工人阶级的一部分 对这一说法,有69.7%的人予以肯定,10.1%的人不置可否,7.2%的人予以否定,另有13.0%的人没有表示意见。对表示意见的应答者而言,对“科技工作者是工人阶级的一部分”的同意指数为4.4,应该说,肯定指数已经非常高。

科技工作者是先进生产力的代表者 调查表明,对这一判断,有四分之三的人持肯定态度,尽管有3.6%的人持否定态度,7.7%的人不置可否,13.5%的人没有表示自己的意见,综合肯定指数仍高达4.5,正好位于“基本同意”和“同意”的中间。这说明,绝大多数科学家和工程师认为自己是先进生产力的代表者。

科技工作者应该而且能够在社会主义建设中发挥巨大作用 有四分之三的应答者同意这一命题,只有3.7%的人持否定态度;此外,有8.3%的人不置可否,有12.7%的人没有给出自己的意见。归一化处理表明,应答者对这一命题的肯定指数为4.5,也介乎同意与基本同意之间。

(责任编辑 宋义荣)

(上接第42页)

并有加速递增的趋势。IASPEI下属的国际热流委员会(IHFC)每4~5年发布一次全球热流数据,但研究分析往往仅限于等经纬度网格的统计处理,尚不足以深刻地揭示大地热流的全球分布规律。目前已初步建立的热流分布与全球板块模式的关系,热流随地质年代变老的递减规律,以及热流省的概念等,所有这些研究成果基本上属于表象学的范畴,有进一步深化和更新的必要,直至建立较完整系统的全球热流解释模型。

应用地热学在90年代将获得显著的进展。我国是能源资源相对紧缺的国家,地热资源的开发远景是不容忽视的,因此,热储工程学知识体系的引进消化,并结合我国的国情和资源条件,优化改造为适用的热储工程学体系是90年代重要的学科

使命。就油气资源的探查和预测而言,地热学方法的学科潜力越来越被重视和实际应用,预期在90年代可初步形成以油气为主的多种矿产资源预测为主要目标的盆地热历史动态模拟的理论、方法和技术的完整学科体系。

高新技术的飞速发展有力地冲击着实验地热学的学科内涵。预计实验地热学的理论基础不致于在90年代发生重大改观,但其技术装备水平必将逐步融进近代技术发展的主流。可以预期,在未来的十年中,高新技术在地热计量、测试、标定,尤其是计算机模拟控制技术和精密仪器科学的领域内将逐步获得普及性的应用。另外,适用于地热学科的国际标准(包括标准方法和标准材料)的建立,将是90年代令人瞩目的新进展之一。

(责任编辑 宋义荣)